

DE 41 19 744 A 1

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Auswertung der Phasenlage periodischer Helligkeitsmuster, wobei mehrere relativ zueinander in der Phase verschobene Helligkeitsmuster mit einer Kamera aufgezeichnet werden und in einem ersten Schritt die Phasenlagen der Muster in den einzelnen Objektpunkten entsprechenden Bildpunkten aus den einzelnen Videobildern getrennt ermittelt werden, und daraus die Phasenverschiebung der Muster relativ einer Anfangsphase bestimmt wird.

Ein derartiges Verfahren ist aus der US-PS 47 68 881 bekannt. Es werden zwei Interferogramme aufgezeichnet, deren streifenförmige Helligkeitsmuster gegeneinander und damit relativ zur Kamera um einen beliebigen Streifenbruchteil $\alpha < \pi$ in der Phase verschoben sind. Durch räumliche Fouriertransformationen werden aus jedem aufgezeichneten Interferogramm zu den Objektpunkten gehörige Phasenwerte und die Phasenverschiebung zwischen beiden Interferogrammen berechnet (Auswertung im Ortsbereich). Die berechnete Phasenverschiebung wird jedoch lediglich dazu benutzt, das ganzzahlige Vielfache der Zahl 2π der berechneten Phasenwerte in einer sogenannten Sprungstellenbeseitigung (phase unwrapping) eindeutig zu bestimmen. Dazu wird lediglich das Vorzeichen der berechneten Phasenverschiebung an dem jeweiligen Objektpunkt berücksichtigt, während der Wert der Phasenverschiebung bei der weiteren Auswertung unberücksichtigt bleibt.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist die Tatsache, daß eine Phasenverschiebung zwischen den beiden aufgezeichneten Interferogrammen vorausgesetzt wird, die kleiner als π ist. Diese Bedingung kann bei Erschütterungen, die beispielsweise beim Einsatz des Interferometers in Werkstätten nur schwer vermeidbar sind, leicht verletzt werden. Eine zuverlässige Auswertung der Interferogramme ist dann nicht mehr gewährleistet.

Darüber hinaus hat dieses Verfahren den Nachteil, daß der zu einem Objektpunkt berechnete Phasenwert aufgrund der räumlichen Fouriertransformation nicht unbeeinflusst von dem Phasenwert in benachbarten Objektpunkten ist. Die laterale Meßauflösung, die Auflösung in der Kameraebene, ist dadurch geringer, als die laterale Auflösung der Kamera selbst. Dieser Nachteil ist bei allen Auswerteverfahren gegeben, die zur Berechnung des Phasenwertes in einem Objektpunkt auch die Meßwerte in benachbarten Objektpunkten berücksichtigen, denn die räumliche Auswertung wirkt stets als Tiefpaßfilter.

Der letztgenannte Nachteil ist bei den sogenannten Phasenverschiebungsverfahren vermieden, bei denen mindestens drei in der Phase verschobene Helligkeitsmuster zeitlich nacheinander aufgenommen werden und der zu einem Objektpunkt gehörige Phasenwert aus den Helligkeiten der phasenverschobenen Helligkeitsmuster in diesem Objektpunkt berechnet wird (Auswertung im Zeitbereich). Einige Algorithmen zur Auswertung solcher phasenverschobener Muster sind in dem Aufsatz von K. Creath "Comparison of phase measurement algorithms" in Proceedings of the SPIE Vol. 680 (1986) miteinander verglichen. Sei diesem Verfahren ist es jedoch erforderlich, die Werte der Phasenverschiebungen zwischen den Mustern sehr genau zu kennen, da von der Genauigkeit dieser Werte die erreichbare Meßgenauigkeit wesentlich abhängt. Dazu können entweder die Phasenstufen jeweils gemessen oder der zur Phasenverschiebung verwendete Piezotranslator kalibriert werden. Außerdem ist es u. a. aus obigem Aufsatz auch bekannt, aus vier phasenverschobenen Helligkeitsmustern den Wert der Phasenverschiebung zu berechnen, wenn die Phasenverschiebung stets denselben Betrag hat.

Aus Applied Optics, Vol. 27, 5082 (1988) ist darüber hinaus eine iterative Methode zur Korrektur der einzelnen Phasenstufen beim Phasenverschiebungsverfahren bekannt. Dazu werden die Meßwerte nacheinander aufgezeichneter Interferogramme in zwei Kamerapixeln berücksichtigt, die sich in Phasenquadratur zueinander befinden. Aus diesen Meßwerten wird iterativ ein Korrekturwert für die am Piezotranslator, der der Phasenverschiebung dient, anliegenden Spannung gewonnen. Die an dem Piezotranslator anliegende Spannung wird dann derart eingestellt, daß die Summe aller Phasenstufen gerade 2π ergibt und die einzelnen Phasenstufen äquidistant sind.

Eine verbesserte Korrektur der Phasenstufen ergibt sich, wenn zur Berechnung des Korrekturwertes die Meßwerte mehrerer Kamerapixel berücksichtigt werden. Nachdem ein Korrekturwert für zwei sich in Phasenquadratur befindliche Kamerapixel berechnet ist, wird ein nächster Korrekturwert für die beiden benachbarten Kamerapixel und ein weiterer Korrekturwert für die beiden übernächsten Kamerapixel berechnet. Dieses Vorgehen wird über ein ganzzahliges Vielfaches der Streifenperiode wiederholt. Der verbesserte Korrekturwert ergibt sich dann als Mittelwert der einzelnen Korrekturwerte. Dabei ist jedoch vorausgesetzt, daß sich die beiden benachbarten Kamerapixel wiederum in Phasenquadratur befinden, daß also das Streifenmuster eine Raumfrequenz hat, die sich auch über eine Vielzahl von Kamerapixeln nur geringfügig ändert.

Wie bereits weiter oben angedeutet, ist es bei allen Phasenverschiebungsverfahren erforderlich, die vorgesehenen Phasenstufen mit hoher Genauigkeit einzuhalten bzw. die tatsächlichen Phasenstufen genau zu bestimmen. Die genaue Einhaltung der vorgesehenen Phasenstufen ist jedoch bei Anwesenheit von Erschütterungen häufig nicht oder nur durch aufwendige mechanische Dämpfungsmaßnahmen möglich. In diesem Fall versagt auch das in Applied Optics, Vol. 27, 5082, (1988) beschriebene und sehr rechenaufwendige Korrekturverfahren, da die Korrektur des Piezotranslators vor der eigentlichen Topographiemessung erfolgt. Die Messung der tatsächlichen Phasenstufen ist insbesondere bei Präzisionsmessungen sehr aufwendig, da die Phasenstufen mit in etwa der Genauigkeit gemessen werden müssen, die der gewünschten Meßauflösung des Interferometers entspricht.

Die soeben beschriebenen Probleme treten nicht nur bei der Auswertung interferometrischer Streifenbilder, sondern auch bei der Topographiemessung mittels projizierter Streifen auf. Entsprechende Verfahren sind beispielsweise aus SPIE Vol. 728, 189, (1986), der US-PS 44 88 172, US-PS 44 99 492 und der US-PS 46 41 972 bekannt. Bei diesen Verfahren werden mehrere in der Phase verschobene Streifenmuster auf die zu untersuchende Oberfläche projiziert und jeweils ein Bild des projizierten Musters aufgenommen. In Analogie zur Phasenverschiebeinterferometrie wird dann aus den Intensitätsmeßwerten der verschiedenen phasenverschobenen Bilder die Oberflächenrekonstruktion in jedem Bildpunkt der Kamera rekonstruiert. Auch hier ist es erforderlich, die Werte der Phasenstufen sehr genau zu ermitteln, da auch hier fehlerhafte Phasenstufen zu fehlerhaften Meßwerten führen.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, daß eine Auswertung der Helligkeitsmuster mit maximaler lateraler Auflösung ermöglicht und auch bei äußeren Störungen, wie Erschütterungen, eine zuverlässige und genaue Auswertung gewährleistet.

Diese Aufgabe wird gemäß dem kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 dadurch gelöst, daß anhand der in dem ersten Verfahrensschritt berechneten Phasenverschiebungen in einem zweiten Schritt die Phasenlagen der Muster in den einzelnen Bildpunkten aus mindestens drei relativ zueinander in der Phase verschobenen Mustern bestimmt werden.

Durch die pixelweise Auswertung von mindestens drei Bildern im zweiten Verfahrensschritt ist eine hohe laterale Auflösung gewährleistet, denn die hier ermittelten Phasenlagen der Muster werden völlig unabhängig von den Phasenlagen der Muster in benachbarten Kamerapixeln berechnet. Eine Tiefpaßfilterung findet daher nicht statt.

Der zweite Verfahrensschritt ist zwar für sich alleine betrachtet aus den bereits zitierten Literaturstellen bekannt. Die vorliegende Erfindung besteht dementsprechend gerade darin, das an sich bekannte Verfahren zur getrennten Auswertung einzelner Muster (Auswertung im Ortsbereich) dazu zu verwenden, die Phasenlage phasenverschobener Muster zueinander oder bezüglich einer vorgegebenen Anfangsphase genau und zuverlässig aus den aufgenommenen Bildern selbst zu ermitteln, um unter Ausnutzung dieser Kenntnis eine Auswertung nach dem Phasenverschiebungsverfahren mit hoher lateraler Auflösung durchzuführen (Auswertung im Zeitbereich). Dadurch ist stets der Wert der tatsächlichen Phasenverschiebung auch bei Anwesenheit von äußeren Störungen, wie z. B. Erschütterungen, nach Durchführung des ersten Verfahrensschrittes bekannt. Bestimmte Werte oder ein bestimmter Wertebereich für die Phasenstufen sind dabei nicht einzuhalten, sondern die Phasenstufen können durchaus stochastische Werte annehmen. Dadurch arbeitet das erfindungsgemäße Verfahren auch beim Einsatz in Werk- und Produktionsstätten sehr zuverlässig.

Während es bei den bekannten Verfahren zur getrennten Auswertung einzelner Muster wie in der US-PS 47 68 881 stets erforderlich ist, auch das ganzzahlige Vielfache der Zahl 2π an jedem Objektpunkt zu berechnen, ist eine solche zeitaufwendige Sprungstellenbeseitigung beim ersten Verfahrensschritt nicht erforderlich. Zur Durchführung des zweiten Verfahrensschrittes genügt es nämlich, wenn die Werte der Phasenstufen modulo 2π bekannt sind. Die Genauigkeit, mit der diese Phasenstufen im ersten Schritt ermittelt werden, ist dabei unabhängig von den Werten dieser Phasenstufen selbst. Und diese Phasenstufen dürfen durchaus auch Werte annehmen, die betragsmäßig größer als π sind. Geeichte und hochgenaue Translatoren zur Bewegung der Muster sind daher nicht erforderlich.

Die Auswertung der Muster im ersten Verfahrensschritt liefert die Werte der Phasenstufen in Abhängigkeit der lateralen Ortskoordinaten in den Kamerabildern. Dementsprechend ist es auch bei der Auswertung im zweiten Verfahrensschritt möglich, von den lateralen Ortskoordinaten abhängige Phasenstufen zu berücksichtigen. Solche ortsabhängigen Phasenstufen können beispielsweise in der Phasenschiebeinterferometrie durch Kippungen des Referenzspiegels auftreten. Es werden dann zur Bestimmung der Phasenverschiebungen die globalen Phasenlagen durch mathematische Funktionen approximiert. Diese Approximation entspricht einer räumlichen Mittelung der Phasenstufen.

Besonders vorteilhaft ist es jedoch, insbesondere bei Anwendungen, bei denen solche ortsabhängigen Phasenstufen nur von untergeordneter Bedeutung sind, die im ersten Verfahrensschritt berechneten Phasenwerte verschiedener Kamerabilder an einander entsprechenden Objektpunkten voneinander abzuziehen und diese Differenzen über eine Vielzahl von Objektpunkten zu mitteln. Durch diese Mittelung kann der statistische Fehler, mit denen die Werte der Phasenstufen behaftet sind, um den Faktor \sqrt{n} reduziert werden, wobei n die Anzahl der gemittelten Differenzen ist.

Die Ermittlung der Phasenlage der Helligkeitsmuster im ersten Verfahrensschritt erfolgt vorteilhafterweise durch Faltung der Intensitätsmeßwerte mit einer zweidimensionalen Faltungsfunktion. Solche Faltungsalgorithmen sind beispielsweise in der deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen P 40 14 019.9 beschrieben.

Bei Anwendung des Verfahrens zur Topographiemessung mittels projizierter Helligkeitsmuster ist es vorteilhaft, wenn mindestens zwei Muster gleicher räumlicher Periode unter einem Winkel zueinander geneigt projiziert werden und das gesamte Auswerteverfahren für jedes Muster durchgeführt und anschließend die Differenzen der Phasenwerte der Muster gebildet wird. Durch diese Differenzbildung wird eine Schwebungsfrequenz gebildet, deren Phasenlage unabhängig von der relativen Phasenlage der Muster ist. Die Phasenlage dieser Schwebungsfrequenz ändert sich daher bei der Phasenverschiebung der einzelnen Muster nicht, solange die Phasenstufen für die geneigt zueinander projizierten Muster gleich sind. Dieses läßt sich technisch leicht realisieren, indem zwei Projektionsgitter gleicher Periode an einem gemeinsamen Gitterträger angebracht sind. Zur Phasenverschiebung wird dann der Gitterträger verschoben.

Die Auswertung der Phasenlagen der geneigt projizierten Muster kann parallel erfolgen, um kurze Auswertzeiten zu gewährleisten.

Werden insgesamt drei Muster gleicher räumlicher Periode unter unterschiedlichen Neigungswinkeln projiziert, so können durch Differenzbildung der ermittelten Phasenwerte zwei Schwebungsfrequenzen gebildet werden, wodurch der Eindeutigkeitsbereich der Messung deutlich vergrößert wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann zwar mit einem entsprechend programmierten Rechner durchgeführt werden. Um jedoch kurze Auswertzeiten zu erhalten, ist es zweckmäßig, einen speziellen hardwaremäßigen Auswerterechner vorzusehen. In einem solchen Auswerterechner sollten für die Berechnung der Phasenlagen im ersten Verfahrensschritt und für die Berechnung der Phasenlagen im zweiten Verfahrensschritt jeweils getrennte Schaltungsanordnungen vorgesehen sein. Da zur Durchführung des zweiten Verfahrensschrittes das Ergebnis des ersten Schrittes benötigt wird, sollte noch ein Speicher vorhanden sein, in dem das jeweilige Kamerabild des Helligkeitsmusters abgespeichert ist.

Die Schaltungsanordnungen zur Bestimmung der Phasenlage sowie zur Bildung der Differenz der Phasenla-

gen der Muster sind vorteilhaft aus Bildspeichern, look-up-Tabellen und arithmetisch logischen Einheiten aufgebaut. Dies ermöglicht eine Auswertung der Muster in Videoechtzeit.

Die Einrichtung zur Mittelung der Phasendifferenzen ist vorteilhafterweise wenigstens teilweise hardwaremäßig aufgebaut. Lediglich dann, wenn die Anzahl der gemittelten Differenzen von Kamerabild zu Kamerabild schwankt, ist es zweckmäßig, die Division durch die Anzahl der gemittelten Differenzen in dem Rechner durchzuführen, der den Meßablauf steuert. Eine schwankende Anzahl der gemittelten Differenzen ergibt sich immer dann, wenn eine Maskeneinrichtung vorgesehen ist, die ungültige Meßwerte maskiert und dadurch von der weiteren Berücksichtigung ausschließt.

Wenn mehrere zueinander geneigt projizierte Muster aufgenommen werden, sollte für jedes Muster eine eigene Schaltungsanordnung zur Berechnung der Phasenlage im zweiten Verfahrensschritt vorgesehen sein, so daß die Auswertung der verschiedenen Muster parallel und dadurch schnell erfolgt.

Im folgenden werden Einzelheiten der Erfindung anhand des in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 eine perspektivische Darstellung einer Anordnung zur Streifenprojektion;

Fig. 2 eine Prinzipskizze, die den optischen Aufbau des Streifenprojektors aus Fig. 1 zeigt; und

Fig. 3a - c sind Teilschaltbilder des zur Signalauswertung der Vorrichtung aus Fig. 1 und 2 benutzten Auswerterechners.

In den Fig. 1 und 2 ist ein Aufbau dargestellt, der im wesentlichen aus drei Projektoren mit den Projektionsoptiken (P_1), (P_2) und (P_3) und drei Gittern (G_1), (G_2) und (G_3) mit jeweils gleicher Gitterperiode sowie aus drei Blitzlampen (L_1), (L_2), und (L_3) besteht. Der Kamerasensor (K) nimmt die nacheinander projizierten, durch die unregelmäßige Objektoberfläche (O) deformierten Streifenmuster der Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) auf. Die drei Gitter (G_1), (G_2), (G_3) haben eine kosinusförmige Transmissionscharakteristik. Während die Projektoren (P_1) und (P_2) unter einem relativ großen Winkel (α_1) von ca. 30° zueinander geneigt sind, schließen die beiden nebeneinander angeordneten Projektoren (P_2) und (P_3) einen relativ kleinen Winkel (α_2) von beispielsweise $0,5^\circ$ ein. Dieser kleine, in der Zeichenebene wirksame Winkel (α_2) kann dadurch realisiert sein, daß der Projektor (P_2) mit dem Gitter (G_2) oberhalb der Zeichenebene und der Projektor (P_3) mit dem Gitter (G_3) unterhalb der Zeichenebene angeordnet ist. Da eine Verschiebung der Projektoren und der Gitter parallel zu den Teilungen der Gitter keinen Einfluß auf die Auswertung der von der Kamera (K) aufgenommenen Bilder hat, ist in dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 2 die Anordnung der Projektionszentren (Z_1), (Z_2) und (Z_3) zur Vereinfachung auf einer Geraden vorgesehen.

Durch diese Anordnung lassen sich zwei Sätze von Ebenen konstanter Phasendifferenz definieren, nämlich die Phasendifferenzen der Streifenmuster der beiden Projektoren (P_1) und (P_2) sowie die Phasendifferenzen der beiden Streifenmuster der Projektoren (P_2) und (P_3), wobei den aufeinanderfolgenden Flächen gleicher Phasendifferenz unterschiedliche effektive Wellenlängen (λ_{eff}) in z-Richtung zugeordnet werden kann. Die effektive Wellenlänge (λ_{eff}) wird durch die Gitterkonstante der Gitter (G_1), (G_2) und (G_3) und den Winkel (α_1) bzw. (α_2) zwischen den Projektionsachsen der jeweiligen Projektoren bestimmt und hängt, da die Gitterkonstanten der Gitter (G_1) bis (G_3) gleich sind, deshalb nur von den Winkeln (α_1) und (α_2) ab. Nachfolgend werden Formeln abgeleitet, aus denen sich die Objektkoordinaten (x), (y) und (z) aus den von den drei Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) projizierten Streifenmustern für die einzelnen Punkte der Objektoberfläche berechnen lassen. Hierfür ist vorausgesetzt, daß sich die Projektionszentren (Z_1), (Z_2) und (Z_3) der Projektionsobjektive auf einer sich in x-Richtung erstreckenden Geraden liegen und die drei Gitter (G_1) bis (G_3) in einem gleichen Abstand (a) hinter dieser Geraden angeordnet sind. Die Gitter sind beispielsweise auf einem gemeinsamen Träger (W) aus Glas oder einem Material mit niedrigem thermischem Ausdehnungskoeffizienten wie z. B. Zerodur angeordnet und können zur Bewegung der Muster gemeinsam relativ zur CCD-Kamera (K) in Richtung der Geraden (x) mit Hilfe einer Federwinde spielfrei bewegt werden. Auch die Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) sind auf einem gemeinsamen in Fig. 1 nicht dargestellten Träger angeordnet, der aus dem gleichen Material besteht, wie der Träger (W) der Gitter. Eine hinreichende Wärmeleitung zwischen beiden Trägern gewährleistet, daß der Temperaturunterschied zwischen ihnen gering ist. Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Meßgenauigkeit ist dadurch reduziert. Die photoempfindliche Fläche der Kamera, d. h. der CCD-Sensor ist im Abstand (a_K) hinter dem Beobachtungsobjektiv (Bo) angeordnet.

Durch den beschriebenen Aufbau ist die Geometrie des Meßgeräts im wesentlichen bestimmt. Die z. B. an einem exemplarischen Punkt ($x, y = 0, z$) projizierten Gitterorte (x_{p1} , x_{p2} , x_{p3}) werden mit der Videokamera, z. B. einer CCD-Kamera, beobachtet. Das Zentrum (x_{0K}) des Beobachtungsobjektivs (Bo) der Kamera legt den Ursprung des von den Projektoren (P_1) bis (P_3) vorbestimmten Koordinatensystems fest.

Durch Betrachten ähnlicher Dreiecke erhält man für die Projektoren

$$\frac{x_{p1} - x_{op1}}{a} = \frac{x - x_{op1}}{z} \quad (1)$$

$$\frac{x_{p2} - x_{op2}}{a} = \frac{x - x_{op2}}{z} \quad (2)$$

$$\frac{x_{p3} - x_{op3}}{a} = \frac{x - x_{op3}}{z} \quad (3)$$

und für die Kamera

$$\frac{x_k}{a_k} = \frac{x}{z} \quad (4)$$

Die Kombination der Kameragleichung (4) mit den Projektionsgleichungen (1)–(3) liefert

$$z = \frac{x_{op1} \cdot a}{(n_1 + \delta_1) P + x_k \frac{a}{a_k}} \quad (5)$$

$$z = \frac{x_{op2} \cdot a}{(n_2 + \delta_2) P + x_k \frac{a}{a_k}} \quad (6)$$

$$z = \frac{x_{op3} \cdot a}{(n_3 + \delta_3) P + x_k \frac{a}{a_k}}, \quad (7)$$

wobei die Differenzen ($x_{opi} - x_{pi}$, $i = 1, 2, 3$) als das $(n_i + \delta_i)$ -fache der Streifenperiode (P) mit (n_i) als einem Element der natürlichen Zahlen und $(\delta_i < 1)$ ausgedrückt sind.

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen den Beobachtungen der Streifenmuster zweier Projektoren und bildet Differenzen, so erhält man aus (5), (6) und (7)

$$z = \frac{(x_{op1} - x_{op2}) \cdot a}{(n_1 - n_2 + \delta_1 - \delta_2) P} \quad (8)$$

$$z = \frac{(x_{op1} - x_{op3}) \cdot a}{(n_1 - n_3 + \delta_1 - \delta_3) P} \quad (9)$$

$$z = \frac{(x_{op2} - x_{op3}) \cdot a}{(n_2 - n_3 + \delta_2 - \delta_3) P} \quad (10)$$

oder

$$z = \frac{K_1}{N_1 - \Delta_1} \quad (11)$$

$$z = \frac{K_2}{N_2 - \Delta_2} \quad (12)$$

$$z = \frac{K_3}{N_3 - \Delta_3} \quad (13)$$

wobei K_1, K_2, K_3 Gerätekonstanten sind, $N_1 = n_1 - n_2$, $N_2 = n_1 - n_3$, $N_3 = n_2 - n_3$ und $\Delta_1 = \delta_1 - \delta_2$, $\Delta_2 = \delta_1 - \delta_3$, $\Delta_3 = \delta_2 - \delta_3$ ist.

Die Formeln (11), (12) und (13) beschreiben Ebenen konstanter Phasendifferenz ($N_i - \Delta_i$) zwischen je zwei Projektionen, die parallel zur x/y -Ebene liegen. Sie hängen nicht vom Beobachtungsort (x_k, y_k) auf der Kamera ab. Zur Messung müssen die ganzen Zahlen (N_1, N_2, N_3) und die Bruchteile ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$) bestimmt werden.

Den Flächen gleicher Phasendifferenz, die durch die Gleichungen (11), (12) und (13) beschrieben sind, lassen sich unterschiedliche effektive Wellenlängen (λ_{eff}) der Phasendifferenzen zuordnen. Für die aus einer Kombination der Projektoren (P_1) und (P_2) gewonnene Gleichung (11) und die aus einer Kombination der Projektoren (P_1) und (P_3) gewonnene Gleichung (12) liegen relativ kurze effektive Wellenlängen vor, während in dem durch Gleichung (13) beschriebenen Fall der Kombination der beiden Projektoren (P_2 und (P_3) eine vergleichsweise große Wellenlänge (Δ_{eff}) zugeordnet werden kann. Wesentlich ist, daß die verschiedenen effektiven Wellenlängen über die Winkel (α_1, α_2) zwischen den Projektoren hochstabil eingestellt werden können.

Für die Auswertung der Messungen in einem Rechner bietet es sich an, die Formeln (11), (12) und (13) noch einmal umzuformulieren:

$$z = \frac{K_1}{\text{int} \left(\frac{K_1}{K_3} N_3 + \frac{K_1}{K_3} \Delta_3 - \Delta_1 \right) + \Delta_1} \quad (14)$$

$$z = \frac{K_2}{\text{int} \left(\frac{K_2}{K_3} N_3 + \frac{K_2}{K_3} \Delta_3 - \Delta_2 \right) + \Delta_2} \quad (15)$$

Zur vollständigen Bestimmung der Koordinaten (x), (y) und (z) eines Bildpunktes werden die Lateralkoordinaten (x) und (y) über das Abbildungsgesetz mit

$$x = \frac{x_k}{a_k} \cdot z \quad (16)$$

$$y = \frac{y_k}{a_k} \quad (17)$$

berechnet.

Zur Auswertung werden die projizierten Streifenmuster der drei Projektoren (P₁) bis (P₃) in Zeitmultiplexbetrieb durch das Objektiv (Bo) von der Kamera (K) aufgenommen und getrennt in verschiedene Bildspeicher eingelesen. Die Berechnung der Objektkoordinaten (x), (y) und (z) nach den angegebenen Formeln geschieht dann wie nachstehend anhand von Fig. 3a – 3c beschrieben in einem hardwaremäßig aufgebauten Bildverarbeitungsrechner. Dieser Rechner verarbeitet die Bilddaten in Videoechtzeit. Er ist hierzu in Form einer Pipelinestruktur auch mit teilweise parallelen Datenpfaden aufgebaut und wird von einem Host-Rechner mit bekannter von Neumann-Struktur, d. h. beispielsweise einem kommerziell erhältlichen Prozeßrechner gesteuert. Für die weitere Beschreibung des Auswerterechners wird auf die Fig. 3a – 3c Bezug genommen, in denen dieser im Blockschaltbild dargestellt ist.

Dort sind vier unterschiedliche Funktionsbaugruppen mit (A), (B), (C) und (D) bezeichnet. Die Funktionsbaugruppe (A) stellt die Schnittstelle zu den externen Sensoren bzw. zu steuernden Teilen der Vorrichtung dar. Sie enthält einen Analog/Digitalwandler (12), der das Signal der Video-Kamera (K) in Videoechtzeit digitalisiert. Zur Ansteuerung der Blitzlampen (L₁) bis (L₃) (siehe Fig. 1) enthält die Schnittstellenkarte (A) eine Triggerschaltung (31), die mit der Kamera (K) synchronisiert ist. Die Schnittstellenkarte (A) enthält außerdem die Steuerelektronik (32) für den Motor, mit dem das Objektiv (Bo) der Kamera (K) auf unterschiedliche Objektbereiche, wie in Fig. 1 durch den Pfeil (Pf₂) angedeutet, scharf gestellt werden kann. Die Abfolge der Blitze und die Verstellung des Objektivs wird entsprechend einem festgelegten Meßprogramm des in der Fig. 3a – 3c nicht dargestellten konventionellen Host-Rechners gesteuert. Dies ist durch die beiden Pfeile "Host" symbolisiert, die auch an anderer Stelle in der Schaltung nach Fig. 3a, 3b und 3c auftauchen.

Das digitalisierte Videosignal, das den A/D-Wandler (12) verläßt, wird, je nachdem welches der drei Muster gerade projiziert wird, in einem von drei Bildspeichern (13a-c) zwischengespeichert. Gleichzeitig ist das digitalisierte Videosignal den Eingängen zweier parallel geschalteter Konvolutionsbausteine (14a) und (14b) in der Funktionsbaugruppe (B) zugeführt. Diese beiden Bausteine (14a) und (14b) führen eine Faltungsoperation durch, um den Sinus bzw. Kosinus der Streifenphase an den einzelnen Objektpunkten aus den Meßwerten in einer Umgebung dieser Objektpunkte zu bestimmen. Entsprechende Algorithmen sind in der Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen P 40 14 019.9 beschrieben. Die Ausgänge der Bausteine (14a, 14b) sind einer Schaltung (15) zugeführt, in der die Streifenphase aus dem Sinus und dem Kosinus berechnet wird. Hierzu ist in einer der Schaltung (15) zugeordneten Tabelle die Funktion Arcustangens abgelegt. Gleichzeitig werden auf der Basis der in der Schaltung (15) berechneten Phasenwerte ungültige Meßwerte maskiert. Ungültige Meßwerte sind solche, die bei entweder zu hoher oder zu geringer Beleuchtungsintensität aufgenommen worden sind und deren Pegel deshalb über oder unter einem vorbestimmten Grenzwert liegt. Die Maske, die diese Bildbereiche maskiert, wird in einem parallel zum Meßdatenstrom in dem mit (C) bezeichneten Schaltungsteil erzeugt, wie nachfolgend noch beschrieben werden wird. Ein Zähler (16) zählt die Anzahl der gültigen Meßpunkte pro Videobild.

Der Ausgang der Schaltung (15) ist drei parallel geschalteten Bildspeichern (17a – c) zugeführt. Dort werden die in der Schaltung (15) berechneten Phasenwerte (δ₁), (δ₂) und (δ₃) der von den drei Projektoren (P₁), (P₂) und (P₃) im Zeitmultiplexbetrieb nacheinander projizierten Streifenmuster zwischengespeichert. Parallel zu den Bildspeichern (17a – c) ist eine als Subtrahierer geschaltete arithmetisch logische Einheit ALU (33) vorgesehen. Diese ALU (33) bildet die Differenz des von der Schaltung (15) berechneten aktuellen Phasenwertes und des zuvor in einem der Bildspeicher (17a – c) abgespeicherten Phasenwertes, der zu einem Muster mit verschobener Phase gehört. Dazu wird der jeweilige Bildspeicher (17a – c) unmittelbar bevor der aktuelle Phasenwert eingelesen wird, noch einmal ausgelesen. Der Ausgang des Subtrahierers ist einer Additionsstufe (34) zugeführt, die die zu den gültigen Meßwerten gehörenden Differenzen der Phasenwerte aufaddiert und die Summe in einem Register (35) ablegt. Auf dieses Register (35) sowie auf den Zähler (16) hat der Hostrechner Zugriff, der den Quotienten aus der im Register (35) abgespeicherten Summe und der Anzahl der gültigen Meßwerte bildet. Dieser Quotient ist ein hochgenauer Mittelwert für die relativen Phasenstufen zwischen aufeinander folgenden Bildern. Die Gesamtphasenverschiebung (φ_i) bezüglich des ersten Bildes ergibt sich durch Summation der relativen Phasenstufen.

Die in den Bildspeichern (13a - c) abgespeicherten Videobilder sind über einen mit (c) bezeichneten Datenpfad einer weiteren Funktionsbaugruppe (D) (siehe Fig. 3c) zugeführt, die zur Berechnung der Phasenlage δ der Muster aus mehreren Phasen verschobenen Mustern dient. Diese Funktionsbaugruppe (D) besteht aus drei parallel geschalteten, identischen Untergruppen. Die Bezugszeichen der ersten Untergruppe sind alle mit einem (a) versehen. Diese Untergruppe verarbeitet die im Bildspeicher (13a) zwischengespeicherten Videobilder. Entsprechend sind die Bezugszeichen der beiden anderen Untergruppen mit einem (b) bzw. (c) versehen, je nachdem ob sie die im Bildspeicher (13b) oder (13c) zwischengespeicherten Videobilder verarbeiten. Es ist somit für jeden Projektor (P₁, P₂, P₃) und somit auch für jedes projizierte Muster eine eigene Untergruppe vorgesehen. Jede dieser Untergruppen führt eine Ausgleichsrechnung der Form

$$\delta = \arctan \frac{-k_1 l_1 + k_2 l_2 - k_3 l_3}{k_1 m_1 - k_2 l_3 + k_3 m_3} \quad (18)$$

für jedes Kamerapixel durch, wobei

$$k_1 = \sum_{i=1}^N l_i$$

$$k_2 = \sum_{i=1}^N l_i \sin \varphi_i$$

$$k_3 = \sum_{i=1}^N l_i \cos \varphi_i$$

$$l_1 = \sum_{i=1}^N \sin \varphi_i \sum_{i=1}^N \cos^2 \varphi_i - \sum_{i=1}^N \cos \varphi_i \sum_{i=1}^N (\sin \varphi_i \cos \varphi_i)$$

$$l_2 = N \sum_{i=1}^N \cos^2 \varphi_i - \left(\sum_{i=1}^N \cos \varphi_i \right)^2$$

$$l_3 = N \sum_{i=1}^N (\sin \varphi_i \cos \varphi_i) - \sum_{i=1}^N \cos \varphi_i \sum_{i=1}^N \sin \varphi_i$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^N \sin \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^N (\sin \varphi_i \cdot \cos \varphi_i) - \sum_{i=1}^N \sin^2 \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^N \cos \varphi_i$$

$$m_3 = N \sum_{i=1}^N \sin^2 \varphi_i - \left(\sum_{i=1}^N \sin \varphi_i \right)^2$$

und N die Anzahl der Phasenverschiebungen ist.

Dabei sind die jeweiligen Intensitätsmeßwerte l_i und die Werte der Phasenstufen (φ_i) bezogen auf den ersten Satz der Videobilder. Der Wert N gibt die Anzahl der durchgeführten Phasenverschiebungen an. Für die Berechnung des gesuchten Phasenwertes δ nach Gleichung (18) ist angenommen, daß sich der Intensitätsmeßwert l_i nach der (i-1)-sten Phasenverschiebung zu

$$l_i = A + B \cos(\delta + \varphi_i) \quad (19)$$

ergibt, wobei A, B Konstanten sind. Es läßt sich zeigen, daß für $N \geq 3$ Phasenverschiebungen der Phasenwert δ aus Gleichung (18) berechnet werden kann.

Im folgenden wird lediglich die erste Untergruppe näher beschrieben. Diese besteht aus drei parallel geschalteten Additions-/Multiplikationseinheiten (43a), (44a), (45a). Jeder dieser Additions-/Multiplikationseinheiten (43a), (44a), (45a) ist der Ausgang des Bildspeichers (13a) über den Datenpfad (c) zugeführt. Den zweiten Eingängen dieser Additions-/Multiplikationseinheiten (43a), (44a), (45a) sind jeweils die Ausgänge eines Bildspeichers (46a), (47a), (48a) zugeführt, in denen anschließend auch das Rechenergebnis wieder abgelegt wird. Die Einheit (43a) addiert lediglich den aktuellen Intensitätswert (I) zu dem bereits im Bildspeicher (46a) abgespeicherten Wert hinzu. Die Einheit (44a) multipliziert den aktuellen Intensitätswert (I) mit dem cosinus der letzten vom Host berechneten Phasenstufe φ und addiert diesen Wert zu dem bereits im Bildspeicher (47a) abgespeicherten Wert hinzu. Analog dazu multipliziert die Einheit (45a) den aktuellen Intensitätswert (I) mit dem sinus φ der letzten Phasenstufe und addiert diesen Wert zu dem bereits im Bildspeicher (48a) abgespeicherten Wert hinzu. Die Werte $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$ werden dabei den Einheiten (44a), (45a), vom Hostrechner zugeführt. Der

Hostrechner selbst berechnet diese Werte aus dem Quotienten der im Register (35) abgespeicherten Summe und der jeweiligen Anzahl der gültigen Meßwerte, die von dem Zähler (16) bereitgehalten wird.

Nachdem die gewünschte Anzahl an Phasenverschiebungen durchgeführt ist, sind im Bildspeicher (46a) die Werte k_1 , im Bildspeicher (47a) die Werte k_2 und im Bildspeicher (48a) die Werte k_3 für alle Bildpunkte abgespeichert. Die in den Bildspeichern (46a), (47a), (48a) aufakkumulierten Werte werden zwei weiteren Additions-/Multiplikationseinheiten (49a), (50a) zugeführt. Diese Einheiten (49a), (50a) lösen gemeinsam mit zwei Bildspeichern (51a), (52a) und einer look-up-Tabelle (53a), in der die Funktionswerte der Arcustangensfunktion abgespeichert sind, die Gleichung (18). Die Werte der Konstanten (1_1) , (1_2) , (1_3) , (m_1) und (m_3) werden den Einheiten (49a), (50a) von dem Hostrechner zur Verfügung gestellt. Dies kann ohne Verzögerung der Auswertegeschwindigkeit erfolgen, da diese Werte für alle Bildpunkte eines Bildes gleich sind. Der somit ermittelte Wert der Streifenphase wird anschließend an dem zugehörigen Speicherplatz des Bildspeichers (17a) in Fig. 3a abgespeichert.

In den beiden anderen Untergruppen der Funktionsbaugruppe (D) werden in analoger Weise Streifenphasen (δ_2) , (δ_3) für Muster mit anderer Projektionsrichtung berechnet. Diese Streifenphasen werden dann entsprechend in dem jeweiligen Bildspeicher (17b) bzw. (17c) abgespeichert.

Die in den Bildspeichern (17a - c) abgespeicherten Phasenwerte werden danach in einer Recheneinheit (19) weiterverarbeitet, die die Differenz $\Delta_1 = \delta_1 - \delta_2$ und $\Delta_2 = \delta_1 - \delta_3$ berechnet. Diese Werte sind zur Berechnung des Objektabstandes z nach den Formeln (11), (12) und (13) erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, daß Δ_3 sich als Differenz aus $\Delta_2 - \Delta_1$ ergibt.

Auf die Recheneinheit (19) folgt eine Summationsstufe (S) (siehe Fig. 3b), die aus einer Recheneinheit (20) und zwei RAM-Speichern (21a) und (21b) besteht. In diesen Speichern (21a) und (21b) werden die Phasendifferenzen (Δ_1) und (Δ_2) für jeden Bildpunkt aufakkumuliert. Dies kann z. B. in einer Integer-Arithmetik so erfolgen, daß die 8-Bit-Eingangswerte der die Phasendifferenzen (Δ_1) und (Δ_2) repräsentierenden Signale in einem Datenbereich von 16 Bit in den Speichern (21a) und (21b) aufsummiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, die aus 255 Messungen gewonnenen Differenzen (Δ_1, Δ_2) durch Summation zu mitteln und damit hinsichtlich der Genauigkeit der Phasenmessung zu verbessern.

Die Ausgänge der Bildspeicher (21a) und (21b) sind zwei darauffolgenden weiteren Recheneinheiten (22a) und (22b) zugeführt, in denen über weitere Tabellen (look-up-tables) die Formeln zur Berechnung des Objektabstandes gemäß Gleichung (14) und (15) bereitgehalten sind. Diese Recheneinheiten (22a) und (22b) berechnen zwei Werte für den Objektabstand (z) , die in einer darauffolgenden Rechenstufe (23) nochmals gemittelt werden. In einem darauffolgenden digitalen Signalprozessor (24) werden die Koordinaten (x) und (y) der Bildpunkte gemäß Gleichung (16) und (17) aus den Meßwerten für (z) und den vom Host-Rechner gelieferten Gerätekonstanten (x_k) , (y_k) und (a_k) berechnet und einer Ausgabeeinheit (25) zugeführt.

Mit der beschriebenen Methode wird die Höheninformation über das zu vermessende Objekt absolut gewonnen und nicht nur Modulo 2π der Streifenphase.

Das vorstehend beschriebene Auswerteverfahren setzt voraus, daß die von der Kamera (K) gelieferten Signale im linearen Bereich der Kamerakennlinie erzeugt werden, daß insbesondere keine Unter- oder Übersteuerung vorkommt. Weiterhin ist es für das beschriebene Verfahren erforderlich, daß ein Phasenwert nur dann weiterverarbeitet wird, wenn die Phasenwerte einer Sequenz, bestehend aus je einer Aufnahme für jede Projektionsrichtung, in dem jeweiligen Bildpunkt gültig sind. Diese Rechenoperationen werden im Schaltungsteil (C) von Fig. 3a durchgeführt. Ob ein Meßwert gültig oder ungültig ist, wird in einem Bit des look-up-tables LUT in der Recheneinheit (15) abgefragt. Die "und"-Verknüpfung über alle Videobilder wird in der Rechenstufe (26) zusammen mit einem rekursiv geschalteten RAM-Baustein (27) erzeugt. In der anschließenden Rechenstufe (28) wird die Anzahl der gültigen Meßwerte an jedem Bildpunkt berechnet und in einem nachfolgenden RAM-Baustein (29) gespeichert. Unter der Anzahl der Meßwerte ist hierbei die Anzahl der Videobilder zu verstehen, über die die Phasendifferenzen im Summationsbaustein (S) von Fig. 3b aufsummiert werden. Setzt man eine geeignet gewählte Grenze, die eine Mindestanzahl von gültigen Messungen für jeden Bildpunkt beschreibt, dann werden all die Bildpunkte ausgeblendet, in denen die Anzahl der gültigen Messungen unterhalb dieser Grenze liegt und alle übrigen Bildpunkte werden in die Ergebnisberechnung miteinbezogen. Die hierdurch beschriebene, über die Bildpunkte gelegte Datenmaske ist durch das mit (30) bezeichnete Quadrat in Fig. 3a symbolisiert. Mit ihr kann der zur Ausgabe dienende Videomonitor (42) an den entsprechenden Bildpunktstellen dunkelgesteuert werden.

Der anhand von Fig. 3a - c beschriebene in Hardware realisierte Auswerterechner stellt eine Lösung dar, mit der die Signale der Kamera zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens verarbeitet werden können. Diese Lösung ist darauf zugeschnitten, daß die Streifenmuster durch die drei Projektoren (P_1) , (P_2) und (P_3) im Zeitmultiplexbetrieb nacheinander projiziert und die Bilder dann von der Kamera (K) nacheinander aufgenommen und verarbeitet werden. Es ist jedoch auch möglich, die Streifenmuster beispielsweise in verschiedenen Farben gleichzeitig zu projizieren und mit drei über Farbteiler getrennte Kameras gleichzeitig aufzunehmen. Dann müssen allerdings der Eingangskanal, d. h. der A/D-Wandler (12), die Konvolutionsbausteine (14a) und (14b), die Recheneinheiten (15) und (16), die im Zeitmultiplexbetrieb arbeiten, in entsprechender Anzahl von drei Stück parallel ausgeführt werden. Dies hat zwar höhere Kosten zur Folge, bietet jedoch auch eine größere Bandbreite in der Verarbeitungsfrequenz. Umgekehrt sind die beschriebenen Rechenoperationen auch auf einem passend programmierten, geeignet leistungsfähigen, sequentiell arbeitenden Rechner herkömmlicher Struktur ablauffähig, allerdings dort nur mit erheblich längeren Laufzeiten, so daß eine Echtzeitverarbeitung der Videosignale in diesem Falle nicht zu erzielen ist.

In der Funktionsbaugruppe (D) wird zur Berechnung der Streifenphasen aus mehreren phasenverschobenen Mustern eine Ausgleichsrechnung durchgeführt. Die Anzahl der Phasenverschiebungen kann eine beliebige Zahl, die größer als 3 ist, sein. Jedoch müssen mindestens drei Phasenstufen vorliegen, von denen keine gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Streifenperiode ist, da ansonsten das Gleichungssystem nicht lösbar ist. Die

Wahrscheinlichkeit, daß mindestens drei solche Phasenstufen vorliegen, wächst mit der Anzahl der Phasenverschiebungen stark an. Darüber hinaus nimmt die statistische Sicherheit der ermittelten Streifenphasen mit der Anzahl der ausgewerteten Phasenstufen zu.

In dem beschriebenen Ausführungsbeispiel hat die Kamera einen Sensor (K) mit 512·512 Pixeln. Die Intensitätswerte jedes Kamerapixels werden im Analog/Digitalwandler (12) auf 8 Bit Datenbreite digitalisiert. Dementsprechend ist das Register (35), in dem die aufakkumulierten Differenzen der Phasenlage relativ zur Kamera verschobener Muster gespeichert sind, mindestens als 26-Bit-Register ausgelegt. Im Idealfall, wenn alle Meßwerte der Videobilder gültig sind, können dann 2^{18} Phasendifferenzen gemittelt werden. Dieser Mittelwert ist statistisch um einen Faktor 512 genauer als jede einzelne Phasendifferenz. Durch diese Mittelung sind die Werte der Phasenstufen, die ja für die Ausgleichsrechnung nach Gleichung (18) benötigt werden, auf ca. $2 \pi / 10\,000$ und damit hochgenau bekannt.

In dem beschriebenen Ausführungsbeispiel ist für jeden Projektor eine separate Lichtquelle (L_1) bis (L_3) vorgesehen. Es ist jedoch auch möglich, den Projektoren das Licht einer einzigen Lichtquelle über einen entsprechend gesteuerten optischen Richtkoppler zeitlich sequentiell zuzuleiten.

Vorstehend ist das erfindungsgemäße Verfahren am Beispiel der Topographiemessung mit projizierten Streifenmustern beschrieben worden. Diese Streifenprojektionsverfahren stellen jedoch nur eine Anwendungsmöglichkeit des Verfahrens dar. Es ist insbesondere auch für die Auswertung interferometrischer Helligkeitsmuster vorteilhaft anwendbar.

Wie bereits weiter oben angedeutet ist, können bei der Auswertung interferometrische Streifenmuster von den lateralen Ortskoordinaten (x, y) abhängige Phasenstufen (ϕ_i) auftreten. Diese lassen sich als Polynome

$$\phi_i(x, y) = a_i + b_i x + c_i y + (\text{Terme höhere Ordnung}) \quad (20)$$

höherer Ordnung darstellen, von denen die a_i jeweils eine konstante Phasenverschiebung und die Terme $b_i x$ und $c_i y$ jeweils eine Kippung beispielsweise der Referenzfläche beschreiben. Der Intensitätsmeßwert $I_i(x, y)$ ergibt sich dann durch Einsetzen der Gleichung (20) in die Gleichung (19). Es sind dann sowohl die Konstante a_i der Phasenverschiebung als auch die Koeffizienten b_i , c_i höherer Ordnung zu bestimmen. Dies kann im Host-Rechner geschehen, indem im Hostrechner Polynome der gewünschten Ordnung oder andere ausgleichende Funktionen an die gemessenen Phasenlagen $\phi_i(x, y)$ angefitet werden. Die Koeffizienten werden dabei mit großer statistischer Genauigkeit ermittelt, solange die Anzahl der zu ermittelnden Koeffizienten klein gegenüber der Anzahl der Bildpunkte in einem Videobild ist. Das Anfiten der Polynome an die Differenzwerte wirkt äquivalent zu einer Mittelung der Phasenstufen.

Nachdem die Koeffizienten der Polynome mit hoher Genauigkeit ermittelt sind, werden anhand dieser Koeffizienten genaue Phasenstufen $\phi_i(x, y)$ sowie $\sin \phi_i(x, y)$ und $\cos \phi_i(x, y)$ berechnet, die dann vom Hostrechner an die Additions-Multiplikationseinheiten (44a, 45a) in der Funktionsbaugruppe (D) zur Auswertung mit hoher lateraler Auflösung weitergegeben werden. Im Gegensatz zur Streifenprojektion sind hier für jeden Bildpunkt eigene Werte $\sin \phi_i(x, y)$ und $\cos \phi_i(x, y)$ erforderlich. Das endgültige Meßergebnis ist dann die Summe aus dem Mittelwert der nach Gleichung 20 berechneten ϕ_i und den Ergebnissen δ der Ausgleichsrechnung nach Gleichung 18.

Zusätzlich zu den Termen höherer Ordnung können in der Gleichung (20) auch Terme mit räumlicher Periodizität enthalten sein, deren Raumfrequenzen klein gegenüber der des erwarteten Streifenmusters sind. Solche Terme werden beispielsweise durch Luftturbulenzen im Interferometerstrahlengang verursacht. Durch das Anfiten der modifizierten Gleichung (20) an die Meßwerte werden dann auch die Amplituden dieser räumlich periodischen Anteile sehr genau bestimmt und bei der Auswertung mit hoher räumlicher Auflösung nach Gleichung (18) berücksichtigt. Dadurch wird ein großer Anteil der durch Luftturbulenzen verursachten Meßfehler unterdrückt.

Es ist klar, daß für die Auswertung interferometrischer Streifenmuster nur eine Untergruppe (43a – 53a) der Funktionsbaugruppe benötigt wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Auswertung der Phasenlage periodischer Helligkeitsmuster, wobei mehrere relativ zueinander in der Phase verschobene Helligkeitsmuster mit einer Kamera aufgezeichnet werden und in einem ersten Schritt die Phasenlagen der Muster in den einzelnen Objektpunkten entsprechenden Bildpunkten aus den einzelnen Bildern getrennt ermittelt werden, und daraus die Phasenverschiebungen der Muster relativ zu einer Anfangsphasenlage bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, daß anhand der in dem ersten Verfahrensschritt berechneten Phasenverschiebungen in einem zweiten Schritt die Phasenlagen der Muster in den einzelnen Bildpunkten aus mindestens drei relativ zueinander in der Phase verschobenen Mustern bestimmt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Phasenverschiebung die Differenz der im ersten Schritt ermittelten Phasenlagen in jeweils einander entsprechenden Bildpunkten gebildet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die zu einer Vielzahl von Bildpunkten gehörenden Differenzen gemittelt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 – 3, dadurch gekennzeichnet, daß in dem ersten Schritt die Phasenlagen der Helligkeitsmuster in den einzelnen Bilder für die einzelnen Objektpunkte durch Faltung der Intensitätswerte mit einer zweidimensionalen Funktion ermittelt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Phasenverschiebungen im

ersten Verfahrensschritt die Phasenlagen durch mathematische Funktionen approximiert werden.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasenmessung für mindestens zwei Helligkeitsmuster, die unter einem Winkel zueinander auf das Objekt projiziert werden, getrennt erfolgt und anschließend die Differenz der Phasen der unterschiedlichen Helligkeitsmuster gebildet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswertung der Phasenlage für die unterschiedlichen Helligkeitsmuster parallel erfolgt.

8. Rechner zur Auswertung der Phasenlage periodischer Helligkeitsmuster, wobei mehrere relativ zueinander in der Phase verschobene Helligkeitsmuster mit einer Kamera aufgezeichnet werden, dadurch gekennzeichnet, daß eine erste Schaltungsanordnung (14a), (14b), (15) vorgesehen ist, welche die Phasenlage der Helligkeitsmuster in den Objektpunkten aus den einzelnen Kamerabildern getrennt berechnet, daß ein Subtrahierer (33) vorgesehen ist, welcher die Differenz der Phasenwerte zweier relativ zueinander in der Phase verschobene Helligkeitsmuster bildet, und daß eine zweite Schaltungsanordnung (43a – 53a) vorgesehen ist, welche die Phasenlage der Helligkeitsmuster für einzelne Bildpunkte aus mindestens drei Videobildern mit relativ zueinander in der Phase verschobenen Helligkeitsmustern unter Berücksichtigung der von der ersten Schaltungsanordnung (14a), (14b), (15) und dem Differenzierer (33) gebildeten Differenzen der Phasenwerte berechnet.

9. Rechner nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß eine Einrichtung (16), (34), (35) vorgesehen ist, die die Differenz der Phasenwerte zweier relativ zur Kamera bewegter Helligkeitsmuster über eine Vielzahl von Objektpunkten mittelt.

10. Rechner nach einem der Ansprüche 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß drei Bildspeicher (13a – c) vorgesehen sind, in denen jeweils Bilder von Helligkeitsmustern gespeichert sind, die unter unterschiedlichen Neigungswinkeln auf das Objekt projiziert sind, und daß die zweite Schaltungsanordnung (43a – 53a), (43b – 53b), (43c – 53c) dreifach vorgesehen ist, so daß die unter unterschiedlichen Neigungswinkeln projizierten Muster parallel ausgewertet werden.

11. Rechner nach einem der Ansprüche 8 – 10, dadurch gekennzeichnet, daß eine Einrichtung (19) zur Bildung der Differenz der Phasenwerte von Helligkeitsmustern vorgesehen ist, die unter unterschiedlichen Neigungswinkeln projiziert sind.

12. Rechner nach einem der Ansprüche 8 – 11, dadurch gekennzeichnet, daß eine Maskeneinrichtung (C) vorgesehen ist, welche die von der ersten Schaltungsanordnung (14a), (14b), (15) berechneten Phasenlagen in den Objektpunkten mit einem gültigen Wertebereich vergleicht und die Weiterleitung der zu einem Objektpunkt gehörigen Daten nur dann gestattet, wenn die berechnete Phasenlage innerhalb des gültigen Wertebereiches liegt.

13. Vorrichtung zur Messung von Objektoberflächen mit

- einem Rechner zur Steuerung des Meßablaufs,
- mindestens zwei Projektoren (P_1), (P_2), (G_1), (G_2) zur Erzeugung und von mindestens zwei Helligkeitsmustern gleicher räumlicher Periode auf dem Objekt,
- einer Videokamera (K) zur Aufnahme der Muster,
- einem gemeinsamen Träger (W) für beide Projektoren, der relativ zur Kamera (K) beweglich ist,
- mindestens zwei Bildspeichern (13a), (13b) zur Zwischenspeicherung der von der Kamera aufgenommenen Muster,
- einer ersten Schaltungsanordnung (14a), (14b), (15) zur getrennten Bestimmung der Phasenlage der Muster in den Objektpunkten aus den einzelnen Videobildern,
- mindestens zwei weiteren Bildspeichern (17a), (17b) zur getrennten Zwischenspeicherung der von der ersten Einrichtung (14a), (14b), (15) berechneten Phasenwerte,
- einem Subtrahierer (33) zur Bildung der Differenz der von der ersten Schaltungsanordnung (14a), (14b), (15) ermittelten Phasenlagen jeweils zweier Videobilder, wobei zwischen der Aufnahme der beiden Videobilder die Muster relativ zum Objekt in der Phase verschoben sind,
- einer zweiten Schaltungsanordnung (43a – 53a) zur Bestimmung der Phasenlage der Muster in den Objektpunkten aus mindestens drei in der Phase verschobenen Mustern des einen Projektors (P_1 , G_1) unter Benutzung der von dem Subtrahierer (33) berechneten Differenz der Phasenlagen dieser Muster,
- einer dritten Schaltungsanordnung (43b – 53b) zur Bestimmung der Phasenlage der Muster in den Objektpunkten aus mindestens drei in der Phase verschobenen Mustern des zweiten Projektors (P_2 , G_2) unter Benutzung der von dem Subtrahierer (33) berechneten Differenzen der Phasenlagen dieser Muster,
- Mitteln (19), (24) zur Bildung der Differenz der von der zweiten und dritten Schaltungsanordnung (43a – 53a), (43b – 53b) berechneten Phasenlagen und zur Berechnung der Oberflächentopographie aus diesen Differenzen und
- Mitteln (42) zur Darstellung der berechneten Oberflächentopographie.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

— Leerseite —

Fig. 1

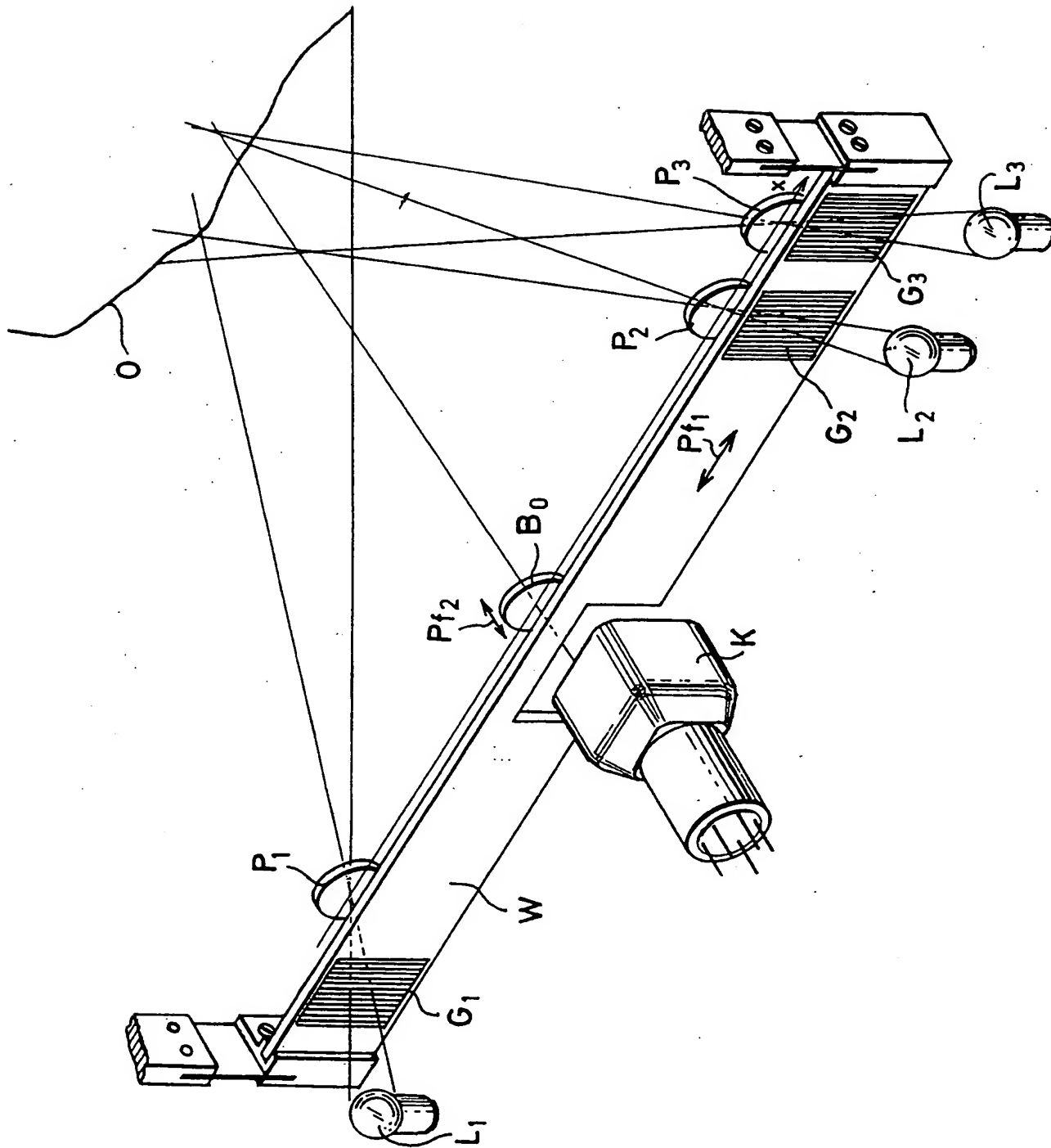


Fig. 2

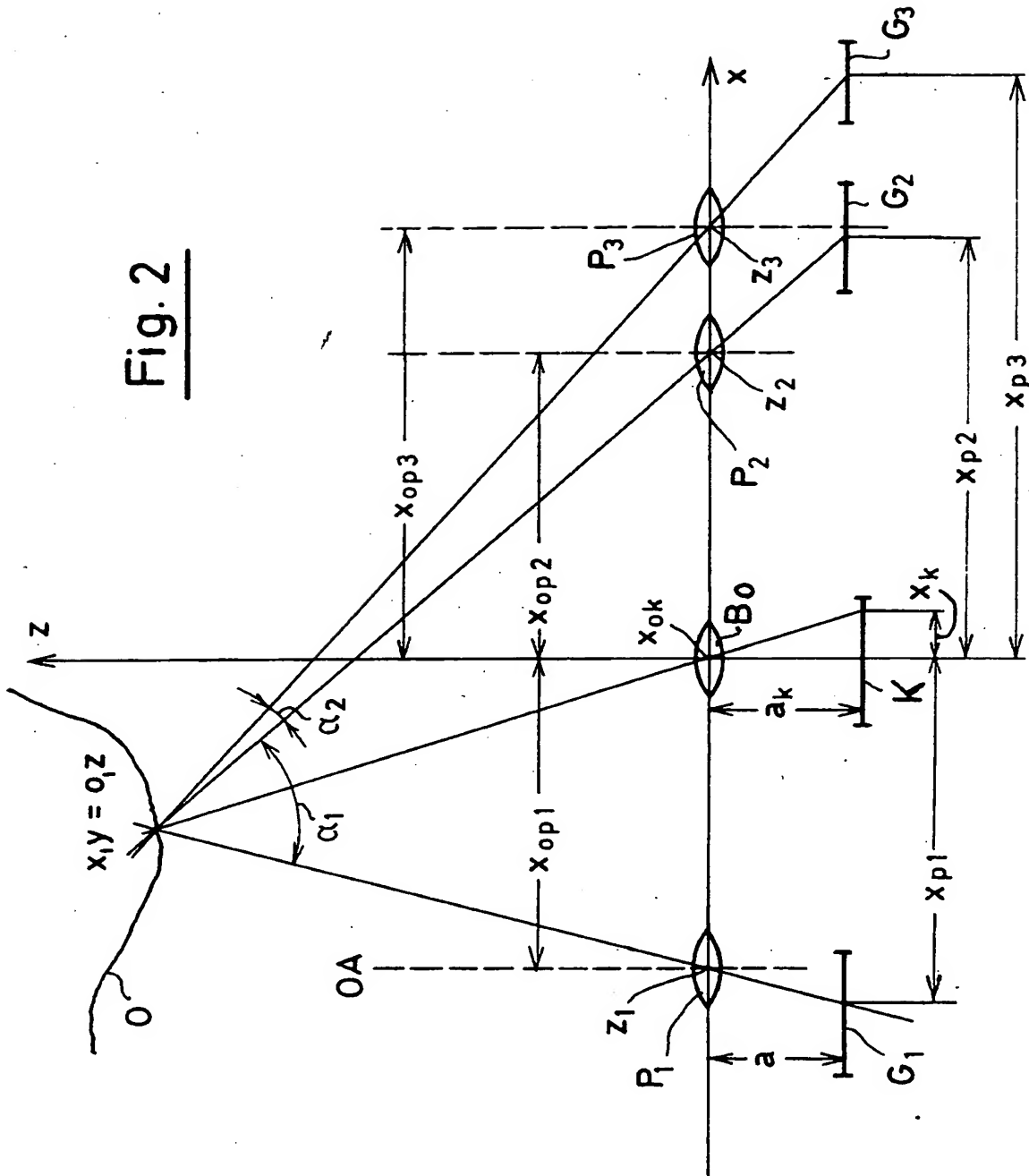


Fig. 3a

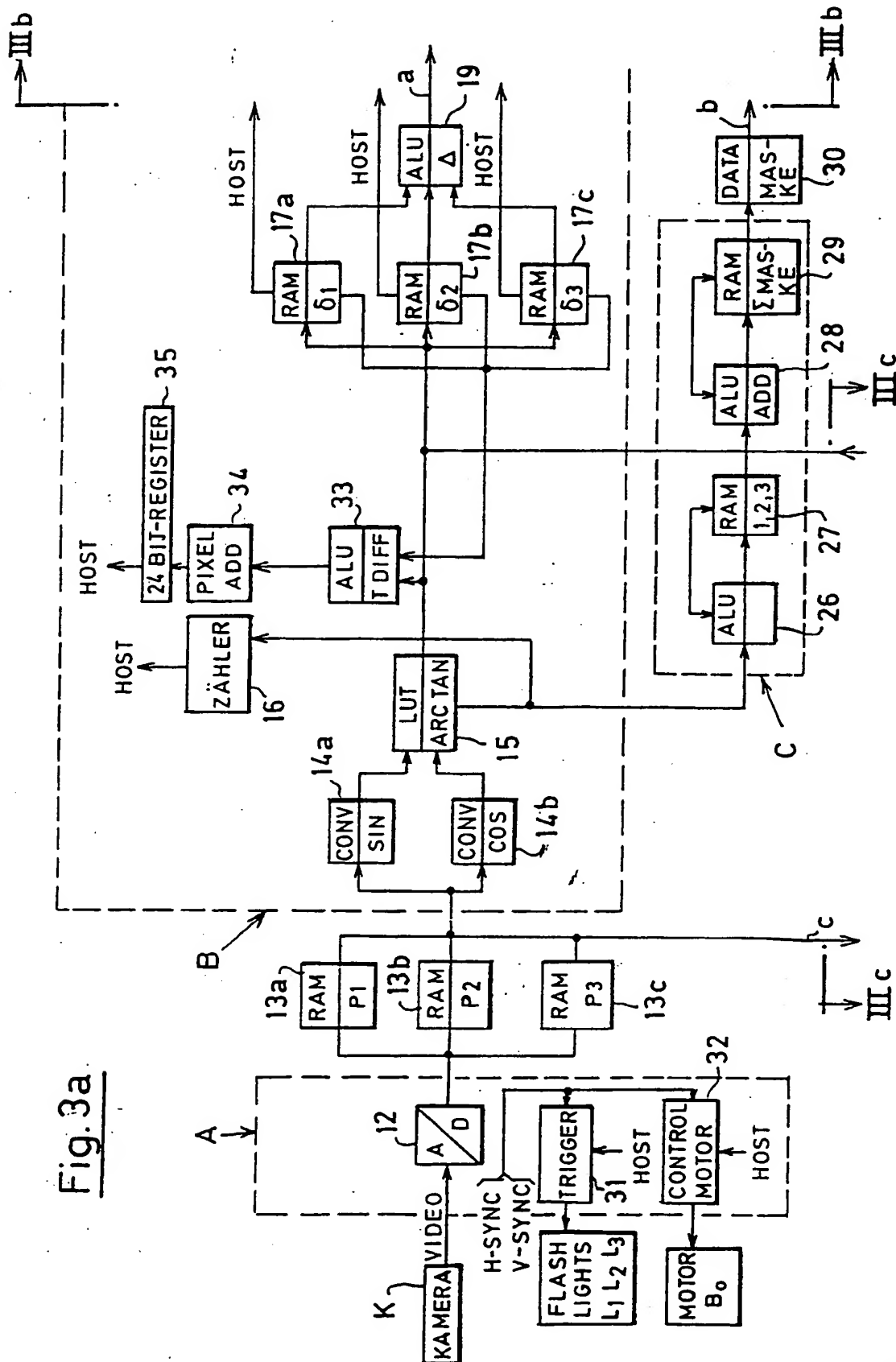
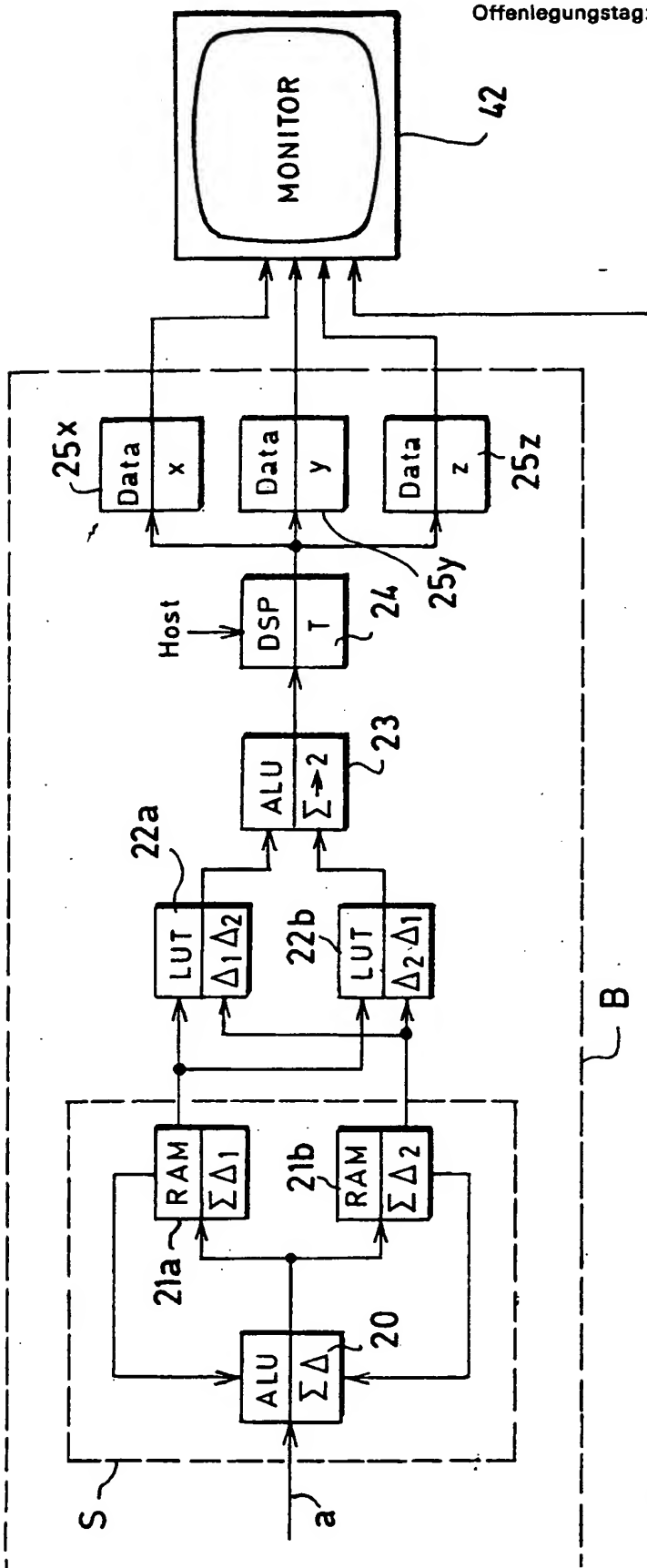


Fig. 3b

IIIa

III



B

b

IIIa

